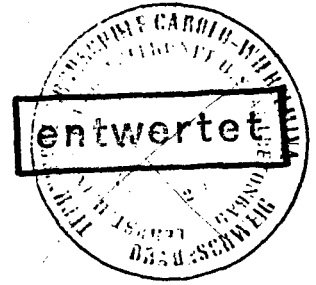


INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU  
DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE BRAUNSCHWEIG  
DIREKTOR: o. PROF. DR.-ING. KARL KORDINA



B e r i c h t

Prüfung des Zustandes von Beton und Stahlbeton  
in der Baupraxis mittels Ultraschall

von

o.Prof. Dr.-Ing. Karl Kordina

Dr.-Ing. Nils V. Waubke

1968

- Az.: II A b V 4. - 107/66 -

St. 309

1100



61597

UNIVERSITÄTS-  
BIBLIOTHEK

## I n h a l t s a n g a b e

1. Allgemeines
2. Laborversuche
  - 2.1 Auswahl und Eigenschaften des verwendeten Gerätes
  - 2.2 Ermittlung von Hohlräumen und Rissen
  - 2.3 Beurteilung des Betonzustandes anhand der Meßwertstreuung
3. Untersuchungen in der Baupraxis
  - 3.1 Untersuchungen an einer Stahlbeton-Deckenkonstruktion (am Bau)
  - 3.2 Untersuchungen an den Unterzügen und Stützen einer hochbe-  
wehrten Rahmenkonstruktion (am Bau)
  - 3.3 Untersuchungen an vorgespannten Hängesäulen (am Bau)
  - 3.4 Untersuchungen an diversen Einzelbauteilen (ausgebaut bzw.  
vor dem Einbau)
4. Schlußfolgerungen
  - 4.1 Verwendbarkeit von Ultraschall bei der Suche nach Hohlräumen  
und Rissen im Beton
  - 4.2 Verwendbarkeit von Ultraschall bei der Beurteilung des Beton-  
zustandes
  - 4.3 Anwendungsgrenzen
5. Zusammenfassung
6. Literatur
7. Anlagen

## 1. Allgemeines

Ausgangspunkt für alle nachfolgend beschriebenen Untersuchungen mittels Ultraschall war das Problem, Impulslaufzeitmessungen als Prüfverfahren für die Baustellenpraxis nutzbar zu machen. Durchstrahlt man ein Bauteil bekannter Dicke auf der Baustelle mit einem Ultraschallimpuls, so errechnet sich aus der ermittelten Laufzeit eine fiktive Schallgeschwindigkeit, der aber in keinem Fall die Rolle einer Materialkonstanten des durchstrahlten Betons zugemessen werden kann. Die gemessene Laufzeit setzt sich nämlich aus der Summe der Einzellaufzeiten durch die verschiedenen Bereiche der inhomogenen Feststoffmatrix des Betons, durch die gas- oder flüssigkeitserfüllten Lunker und Mikrorisse innerhalb des u.U. nur schlecht ausgeführten oder bereits stark gerissenen Betons und schließlich durch die beiden von Art und geometrischer Beschaffenheit der Schwinger abhängigen Übergangsbereiche an Sender und Empfänger zusammen. Dementsprechend ist es auch ungewiß, ob eine auf diese Weise gemessene und sich als sehr gering ergebende Schallgeschwindigkeit lediglich durch das Vorhandensein von Rissen oder Fehlstellen im Beton hervorgerufen wurde, oder ob tatsächlich der Schluß auf einen zwar noch jungfräulichen, seinen Festigkeitsmerkmalen nach aber minderwertigen Beton zulässig ist.

Ziel der Untersuchungen im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig war es daher, ein Verfahren zur Beurteilung von Beton- und Stahlbetonbauteilen auf der Baustelle mittels Ultraschallimpulslaufzeitmessungen zu entwickeln, bei dem man nicht davon abhängig ist, die entsprechenden Laufzeiten für den jungfräulichen, noch unbelasteten Beton entsprechender Qualität zu kennen. Mit ersten Anwendungsversuchen eines solchen Verfahrens in der Baupraxis beschäftigt sich der nachfolgende Bericht.

## 2. Laborversuche

Im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig sind die grundsätzlichen Möglichkeiten einer Beurteilung von Betongüte und Stahlbetonbauteil-Zustand mittels Ultraschallimpulsen in

umfangreichen Laborversuchen analysiert worden. Da über diese Versuche bereits an anderer Stelle [1, 2, 3] ausführlich berichtet ist, seien hier lediglich einige grundsätzliche Gesichtspunkte wiederholt.

## 2.1 Auswahl und Eigenschaften des verwendeten Gerätes

Handelsübliche Geräte zur Erzeugung und Registrierung von Ultraschallimpulsen in Beton waren aus verschiedenen Gründen nicht für die beschriebenen Messungen einzusetzen:

- In vielen Fällen ermöglichen diese Geräte lediglich die Wiedergabe von Sendeimpuls und Empfangsimpulsen auf dem Bildschirm einer Oszillographenröhre und die Ermittlung der Impulslaufzeit durch Ausmessen des Abstandes der beiden Impulse auf dem Bildschirm und Multiplikation mit dem entsprechenden Zeitablenkungsfaktor (in  $\mu\text{sec/cm}$ ). Abgesehen von der unpraktischen Meßmethode hat das oft den Nachteil, daß der Zeitablenkungsmaßstab nicht über die volle Breite des Bildschirms linear und die ermittelte Laufzeit damit von der zufälligen Lage der beiden Impulse zueinander auf dem Bildschirm abhängig ist.
- Manche Geräte ermöglichen zwar auf einem in  $\mu\text{sec}$  geeichten Mikroamperemeter die direkte Ablesung des zeitlichen Impulsabstandes; solche Geräte sind aber günstigstenfalls in der Lage, die jeweils erste für eine Auflösung ausreichende Amplitude des Empfangsimpulses zu registrieren. Ob diese Amplitude jedoch tatsächlich dem geradlinig durch den Beton laufenden Impuls zugehört, bleibt stets fraglich. Der in Anl. 1 skizzierte Versuch zur Überprüfung dieser Frage zeigte, daß in Fällen, in denen Risse quer zur Meßrichtung durch den Beton verlaufen und in denen in randnahen Bereichen gemessen wird, die zeitlich zuerst ankommende Amplitude nicht unbedingt dem geradlinig durch den Beton laufenden Impuls zuzugehören braucht, weil dessen "scheinbarer" Weg durch den Einschluß eines luftgefüllten Risses länger ist.

- Die besten im Handel erhältlichen Geräte für die geplanten Versuche wären solche gewesen, die eine gleichzeitige Projektion von Sende- und Empfangsimpuls zusammen mit stufenweise zu verfeinernden Zeitmarken auf den Bildschirm erlauben: Sieht man von der Tatsache ab, daß bei genauer Messung auch hier der Zeitmarkenabstand zum Rand des Bildschirms hin weder eindeutig konstant noch linear ist, so muß das Auszählen der Zeitmarken doch als recht mühselig angesehen werden. Ein solches Meßverfahren scheint für eine praktische Anwendung auf der Baustelle kaum in Betracht zu kommen.

Aus diesen Erwägungen heraus wurde ein Meßgerät entwickelt, das die positiven Eigenschaften der Sendeteile bekannter Geräte mit den vielseitigen Möglichkeiten eines hochentwickelten Oszillographen empfängerseitig verbindet. Dieses Gerät ermöglicht sowohl für grobe Messungen die Ermittlung der Impulslaufzeiten über Zeitablenkmaßstäbe als auch die direkte Messung der Zeitdifferenz zwischen beiden Impulsen mittels Verschieben des Oszillographenbildes in bezug auf starre Marken am Bildschirm. Darüber hinaus erlaubt das Gerät die gleichzeitige Eingabe zweier derartiger Oszillogramme und die Wiedergabe der Differenzkurve auf dem Bildschirm. Das beschriebene Gerät und ein typisches, zur Impulslaufzeitmessung herangezogenes Oszillogramm auf dem Bildschirm dieses Gerätes zeigt Anlage 2.

Die Geberfrage wurde nach längeren Versuchen mit Seignettesalz-, Quarz- und Bariumtitanatschwingern für die Baustellenuntersuchungen endgültig dahingehend entschieden, daß Bariumtitanatschwinger zur Übertragung der Impulse auf den Beton bzw. zur Aufnahme der Impulse aus dem Beton der Vorzug zu geben war. Die benutzte Ultraschallfrequenz liegt im 50 kHz-Bereich. Als Übergangsmedium wurde auf der Baustelle ausschließlich säurefreie Vaseline verwendet, nachdem sich bei den vorangegangenen Laborversuchen Gips aus verschiedenen Gründen als weniger geeignet erwiesen hatte, Vaseline und Gummi als Ankopplungsmedia jedoch gleich gute Ergebnisse erbrachten.

## 2.2 Ermittlung von Hohlräumen und Rissen

Ultraschallimpulse bieten die Möglichkeit, in Festkörpern Hohlräume oder Risse zu identifizieren, soweit diese Hohlräume in ihren Abmessungen groß gegen die "normalen Inhomogenitäten" des Körpers und mit einem Medium gefüllt sind, dessen charakteristische Schall-Longitudinalgeschwindigkeit deutlich gegen jene des ungestörten Körpers abgehoben ist.

Im Echoverfahren läßt sich anhand der Laufzeitdifferenzen der einzelnen Impulseechos die Lage bzw. die Tiefe solcher Hohlräume, Risse oder Störungen ermitteln. Das wurde bereits von zahlreichen Autoren beschrieben und hat gerade in der letzten Zeit bei der Überprüfung von Klebeverbindungen [4, 5, 6, 7] beträchtliche Erfolge gebracht. Für Beton konnte dieses Verfahren bislang nicht befriedigen, weil das Material selbst bereits eine derart hohe Inhomogenität besitzt, daß Zwischenechos von Zuschlagkorngrenzen oder uninteressanten - weil noch als "normal" anzusehenden - Mikroschwindrissen das Echobild empfindlich stören.

So wurde bei den Untersuchungen zur Beobachtung von Rißentwicklungen und zur Ermittlung von Lunkern, Kiesnestern oder anderen, als Mängel anzusprechenden Störungen in Konstruktionsbetonen im Rahmen der Untersuchungen des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig auf das "Durchschallungsprinzip" [7, 8, 9] zurückgegriffen. Dabei gilt die Laufzeit des über eine bestimmte Meßstrecke geradlinig durch den Beton geschickten Impulses als direktes Maß für die Größe (Ausdehnung) vorhandener Störungen, die Abminderung seiner Amplitude während dieses Weges als Maß für den Typ bzw. das Füllungsmedium der vorhandenen Hohlräume.

Nachdem Rißbildungen und künstlich in Konstruktionsbetone eingeführte Hohlräume im Zuge der Laboruntersuchungen mit Erfolg identifiziert werden konnten [2, 3], war dem Institut in den Jahren 1966/1967 erstmalig die Möglichkeit gegeben, dieses Verfahren auch baustellenpraktisch in größerem Umfang zu erproben.

### 2.3 Beurteilung des Betonzustandes anhand der Meßwertstreuung

Als charakteristische Beurteilungsgröße für den Erhaltungszustand des inneren Gefüges eines Schwerbetons konnte als Ergebnis mehrjähriger Laboruntersuchungen die Streuung der Laufzeitwerte von Ultraschallimpulsen bei Variation des Meßweges über das jeweilige Bauteil erkannt werden. Praktisch läßt sich jener Bereich, innerhalb dessen bei einer vorgegebenen Fraktile (beispielsweise 1-, 5- oder 16-%-Fraktile) alle Laufzeitwerte liegen, als direktes Maß etwa für den Beanspruchungsgrad in Prozent der Festigkeit betrachten, dem der Beton des Bauteils bis zum Untersuchungszeitpunkt bereits unterworfen war. Der sich dabei ergebende Mittelwert stellt in bekannter Weise zugleich ein grobes Maß für die Betongüte dar [1, 2].

Im Rahmen von Baustellenerhebungen und Gutachten war es dem Institut mit den vom Niedersächsischen Zahlenlotto zur Verfügung gestellten Mitteln möglich, über das im Einzelfall erforderliche Maß hinausgehend Untersuchungen durchzuführen und gesamtstatistisch zu erfassen, so daß es möglich geworden ist, ein erstes, zusammenfassendes Urteil auch über die baupraktische Brauchbarkeit dieses skizzierten Verfahrens abzugeben.

### 3. Untersuchungen in der Baupraxis

Von jenen Untersuchungen, die bislang außerhalb des Instituts an ein- oder ausgebauten Bauteilen gemacht werden konnten, seien in der Folge einige repräsentative Ergebnisse ausführlich beschrieben und beurteilt.

Die Dicke der mit den dem Institut zur Verfügung stehenden Geräten bislang durchschallten Bauteile betrug zwischen 20 und 40 cm. Es handelte sich ausnahmslos um konstruktive Elemente hohen Bewehrungsgrades mit Betongüten von B 225 an aufwärts. Die Qualität der Ausführung der untersuchten Bauteile reichte von "gut" bis "unbrauchbar". Die Untersuchungen, deren Gesamtergebnis vom Standpunkt der statistischen Brauchbarkeit und damit der Verfahrensbeurteilung her betrachtet werden, haben in Einzelfällen die Notwendigkeit erheblicher Sanierungsmaßnahmen unterschiedlichster Art nachgewiesen.



### 3.1 Untersuchungen an einer Stahlbeton-Deckenkonstruktion (am Bau)

Es wurde eine Stahlbeton-Deckenkonstruktion über 5 Deckenfelder mit einer zwischen 14 cm und 21 cm schwankenden Dicke überprüft. Die Sollgüte des Betons betrug B 300. Die Verwendung von Transportbeton mit langen Anfahrtswegen und längeren Aufenthaltszeiten hatte den Verdacht nahegelegt, daß eine einwandfreie Verdichtung in der Schalung und damit die Erzielung einer einheitlichen und ausreichenden Betonfestigkeit nicht gewährleistet war. Die gesamte Decke wurde in einem Raster von 50 cm x 50 cm Feldgröße Punkt für Punkt durchschallt. Insgesamt wurden mehrere 100 Meßwerte genommen. Bei Reduktion der ermittelten Laufzeiten auf eine Einheitsdeckendicke waren die Laufzeit-schwankungen jedoch so gering ( $\pm 8\%$  bei Einbeziehung sämtlicher Einzelwerte), daß aufgrund der zerstörungsfreien Prüfung der Verdacht nicht als bestätigt betrachtet werden konnte. Stichprobenartige Bohrkernentnahme und direkte Überprüfung der Druckfestigkeit bestätigten dieses Ergebnis.

Eine statistische Auswertung der Meßwerte erbrachte eine einwandfreie Gauss-Verteilung mit geringer Streuung, was in Anbetracht der Annahme, daß Ausführungsmängel nicht vorliegen, und der Tatsache, daß eine über das Eigengewicht hinausgehende Belastung der Decke zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht stattgefunden hatte, den Erwartungen entspricht.

### 3.2 Untersuchungen an den Unterzügen und Stützen einer hochbewehrten Rahmenkonstruktion (am Bau)

In demselben Gebäude, in dem die oben erwähnte Decke untersucht wurde, zeigten sich an den Unterzügen und Stielen der Rahmenkonstruktion bereits bei oberflächlicher Betrachtung deutlich Ausführungsmängel. Auch hier wurden Ultraschallmessungen zur Überprüfung der Frage angesetzt, ob sich noch lokal weitere, äußerlich nicht sichtbare Mängel finden lassen.

Es handelte sich insgesamt um 5 Unterzüge mit einer Dicke von 40 cm (Durchschallungsrichtung) und 15 hochbewehrte Stützen mit Dicken zwischen 24 cm und 40 cm in der Durchschallungsrichtung.

Nach Abschluß der gesamten Untersuchungen und Sanierung noch aufgefundener Mängel im Zuge der Bauwerks-Begutachtungen wurden die Ergebnisse im Institut wie üblich für Zwecke der Verfahrensbeurteilung statistisch ausgewertet. Da sowohl die o.g. Deckenabschnitte als auch die Rahmenkonstruktion aus gleichem Beton unter gleichen Bedingungen ausgeführt waren, wurden beide Untersuchungen bei dieser Auswertung zusammengefaßt: An den 5 Deckenabschnitten, 5 Unterzügen und 15 Rahmenseiten waren insgesamt 1017 Meßwerte aufgenommen worden. Bezieht man die Einzellaufzeiten sämtlich auf eine Einheitsbauteildicke von 20 cm, so lagen mehr als 90 % aller Werte zwischen 40 und 65 µsec, mehr als 99 % aller Werte zwischen 40 und 90 µsec und lediglich 0,59 % (= 6 Werte) lagen - deutlich gegen den Rest abgehoben - jenseits der 90 µsec-Grenze.

Die 6 Meßwege, an denen diese um mehr als 50 % vom statistischen Mittelwert (ungefähr 60 µsec) abweichenden Werte gefunden wurden, enthielten ausnahmslos zentimetergroße Hohlräume oder zementfreie Kiesnester, wie nachträgliches Aufbohren der Meßstrecken von jeweils beiden Enden ergab. Die Unterschiede in den Teilbereichen Decke einerseits und Rahmenkonstruktion andererseits, soweit sie die bauliche Ausführung betreffen, waren durch die Schalungsverhältnisse und den hohen Bewehrungsgrad der Rahmenkonstruktion bedingt, die ein einwandfreies Einfüllen und Verdichten des - wie eingangs erwähnt - nicht mehr sehr plastischen Betons erschwert hatten.

### 3.3 Untersuchungen an vorgespannten Hängesäulen (am Bau)

Am viergeschossigen Oberbau des Verwaltungsgebäudes einer Versorgungszentrale wurde mittels Ultraschall der Frage nachgegangen, ob und in welchem Umfang die 18 vorgespannten Hängesäulen an der Gebäudeaußenfront in ihren Spannkälen nur unvollständig oder gar nicht ausgepreßt worden waren. Der Querschnitt dieser durchgehenden Säulen, an denen die Geschosse "aufgehängt" sind, ist aus Anl. 3 ersichtlich. Die Vorspannkkräfte waren so berechnet, daß der Säulenbeton im Gebrauchszustand in den drei obersten Geschossen praktisch spannungsfrei ist, im untersten Geschoß nur geringe Druckspannungen aufzunehmen hat. Die Spannkäle waren nach Angabe der ausführenden Firma von unten her über die volle Höhe von rd. 14 m mit Verbundmörtel ausgespreßt worden. Dabei hatten sich aber sofort in einigen Fällen Schwierigkeiten eingestellt, die es offenbar erforderlich machten, die Spannkäle schließlich von oben her bis zur vollen Höhe mit Mörtel aufzufüllen.

Bereits nach dem ersten Winter hatten sich an zahlreichen Stellen der Hängesäule beträchtliche vertikale, über jeweils mehrere Meter, in einem Fall über die volle Säulenhöhe, durchgehende Risse gezeigt, was die Vermutung nahelegt, daß sich in den Spannkälen Hohlräume größeren Umfangs befinden, die - mit Wasser gefüllt - unter der Einwirkung des Frostes eine Sprengwirkung auf den umhüllenden Beton ausgeübt hatten.

Probebohrungen hatten bei Beginn der Ultraschall-Untersuchungen bereits nachgewiesen, daß meterlange, nicht ausgepreßte Spannkalanbereiche und mit nicht ordnungsgemäßen Mörtel ausgespreßte Bereiche vorhanden waren.

Sämtliche Säulen wurden durch das Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig in Höhenabständen von 50 cm, teilweise auch in Abständen von 10 cm, durchschallt, um weitere, mangelhaft ausgepreßte Spannkalanbereiche zu ermitteln. Insgesamt wurden 466 Meßwerte aufgenommen. Aufgrund der Ergebnisse mußten der Baufirma weitere erhebliche Sanierungsmaßnahmen empfohlen werden, die teilweise

in völlig neuem Auspressen der Spannkänäle, teilweise in örtlichem Auffüllen mit geeignetem Mörtel, teilweise auch im Schließen klaffender Risse im Hinblick auf Korrosionsgefahr zu bestehen hatten

Im Zuge der vom Niedersächsischen Zahlenlotto geförderten Verfahrenserprobung wurde auch hier das Gesamtergebnis - unabhängig von den aufgrund der Einzelwerte lokal getroffenen Feststellungen - statistisch ausgewertet. In Tafel 1 (Anlage 3) sind die Meßwerte nach Größenklassen zusammengestellt. Außerdem wurde innerhalb der einzelnen Klassen aufgeschlüsselt nach Werten, die an offenbar defekten, von Rissen durchsetzten oder sonstwie schadhaften Stellen gewonnen wurden und solchen, bei denen Mängel im Beton oder im Spannkanal weder nach dem Augenschein noch ggf. beim nachträglichen Aufbohren des Spannkanales festgestellt werden konnten. Die Gesamtverteilung der Werte besitzt im Bereich zwischen 60 und 61  $\mu\text{sec}$  ein deutliches Maximum. Diese Feststellung legte es nahe, zu überprüfen, ob es sich dabei um eine Gauss-Verteilung handelt.

Figur 4 (Anlage 4) zeigt die Verteilung und die sich daraus ergebenden Summenhäufigkeiten im Wahrscheinlichkeitsnetz (Gauss-Papier), wobei zur Erzielung einer ausreichenden Klassenfüllung hier eine Klassenbreite von 5  $\mu\text{sec}$  gewählt wurde. Ersichtlich besitzt das Kollektiv weder die Eigenschaften einer strengen Gauss-Verteilung noch der Überlagerung einer geringen Zahl (2 oder 3) von Gauss-Verteilungen mit ungleichen Mittelwerten. Diese Feststellung entspricht durchaus der Vorstellung, daß die an den tatsächlich unbeschädigten bzw. ungestörten Bereichen gewonnenen Meßwerte, die für sich einer sauberen Verteilung folgen sollten, von einem komplizierten Kollektiv überlagert werden, das wegen der weiten Grenzen, innerhalb derer die auftretenden Schäden schwanken, kaum die Eigenschaften einer einfachen bzw. übersichtlichen Statistik haben kann.

Geht man trotzdem von der Annahme aus, daß die Mängel in den Säulen vorzugsweise einem ganz bestimmten Typ zuzuordnen sind, beispielsweise in Meßrichtung durch den gesamten Betonquerschnitt durchgehende Risse oder innerhalb des Meßbereiches völlig hohle Spannkänäle bei sonst intaktem

Hüllbeton, so bietet sich der Versuch an, die in Tafel 1 nach "defekt" und "intakt" aufgeschlüsselten Werte getrennt statistisch auszuwerten. Das Ergebnis dieser Auswertungen ist in Figur 5 (Anlage 5) und Figur 6 (Anlage 6) wiedergegeben.

Überraschenderweise zeigt sich die willkürliche Annahme eines Kollektivs aus zwei ausgeprägten Einzelverteilungen und einem geringfügigen, nicht charakteristischen "Untergrund" innerhalb weiter Grenzen recht gut bestätigt: Für die intakten Bereiche ergibt sich mit verhältnismäßig hoher Genauigkeit eine Gauss-Verteilung, bei der 68 % aller Werte innerhalb des Bereiches von  $62,5 \mu\text{sec} \pm 2,2 \mu\text{sec}$  liegen; für die defekten Bereiche ergibt sich mit nahezu gleicher Genauigkeit eine "Gauss-Verteilung" nur oberhalb des formalen statistischen Mittelwertes von  $76,8 \mu\text{sec}$ , bei der 45 % aller Werte zwischen diesem Mittelwert und dem Wert von  $117,5 \mu\text{sec}$  liegen.

Die Tatsache, daß hier in dem schmalen Übergangsbereich zwischen den am intakten Beton gewonnenen Werten und dem Mittelwert der an mangelhaften Stellen gewonnenen Verteilung eine klare Verteilungscharakteristik nicht zu ermitteln ist, muß darauf zurückgeführt werden, daß dieser Bereich gerade alle jene Stellen umfaßt, bei denen der angenommene "Einheitsschaden" nicht in voller Höhe vorliegt: sei es, daß sich im Spannkanal hier doch noch Mörtelbrocken finden, sei es, daß hier im Einzelfall ein Riß entweder nicht den vollen Betonquerschnitt durchzieht oder in seinem Verlauf aus dem eigentlichen Ultraschall-Meßweg ausweicht.

### 3.4 Untersuchungen an diversen Einzelbauteilen (ausgebaut bzw. vor dem Einbau)

Um den am Bau gewonnenen Hinweisen systematisch nachzugehen, wurden im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig Messungen an unterschiedlichen Einzelbauteilen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk bei diesen Messungen war auf die Signifikanz der beispielsweise in den Anlagen 4 bis 6 gewählten Darstellung der Meßergebnisse gerichtet. Insbesondere die Frage, ob Abweichungen der Überschreitungs-

wahrscheinlichkeiten von einer Geraden bei der hier gewählten Wiedergabe im Wahrscheinlichkeitsnetz eine klare Aussage über das durchschallte Betongefüge erlaubt, war zu prüfen.

Zunächst wurde eine ca. 4 m hohe Stahlbetonstütze ( $\alpha = 0,5$ ,  $\lambda = 20$ ), die zuvor bis zum Versagen (Ausknicken) auf Druck beansprucht worden war, nach dem Entlasten in beiden Querrichtungen durchschallt. Die 80 ermittelten Ultraschall-Impulslaufzeiten sind in Anlage 7 zusammengestellt. Der für ein relativ dünnes ( $d = 17,2$  cm) Stahlbetonbauteil hohe Mittelwert der Laufzeiten ist hier an sich schon ein Hinweis auf erhebliche Gefügemängel bzw. Rißbildungen. In dem hier interessierenden Zusammenhang ist jedoch die deutlich gekrümmte Form der Verteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz interessant. Zur Klärung der Frage, ob eine Krümmung von der hier festgestellten Größenordnung evtl. durch eine gleichmäßig bindemittelarme Betonausführung (viele Grobporen oder Kiesnester) hervorgerufen werden kann oder, ob man bei der Ermittlung einer so gekrümmten Verteilung schon eindeutig von Gefügezerstörungen sprechen kann, die dem Festigkeitsverhalten abträglich sein müssen, wurden nunmehr gezielte Untersuchungen an Bauteilen übersichtlicherer "Porositätsverhältnisse" angesetzt.

Zwei Bimsbetonstein-Wände mit praktisch gleicher Bimsbeton-Rohdichte von  $\gamma = 1 \text{ kg/dm}^3$  und einer Dicke von jeweils 24 cm wurden an verschiedenen Stellen durchschallt. Es wurde darauf geachtet, daß der Impulsweg stets im Bereich der Steine, also genügend weit entfernt von den Mörtelfugen lag.

Die erste der beiden Wände bestand aus Bimsbeton-Vollsteinen der Abmessung 24 cm x 49 cm x 11,5 cm. Die an dieser Wand ermittelten Laufzeiten sind in Anlage 8 zusammengestellt. Obgleich der Bimsbeton als gleichmäßig von Hohlräumen durchsetzt angesehen werden kann, die sicherlich mindestens gleich groß oder größer als die normalerweise zulässigen Größtporen eines Konstruktionsbetons sind, ergaben die Meßwerte im Wahrscheinlichkeitsnetz nahezu eine perfekte Gerade. In jedem Falle ist die möglicherweise in der

Anordnung der Meßpunkte zu erkennende Krümmung der Verteilung ihrem Betrag nach nicht mit jener zu vergleichen, die an der zerstörten Stahlbetonstütze (Anlage 7) ermittelt wurde. Dies gilt umso mehr, als die Werte bei der Bimsbetonwand sich im Bereich zwischen 300 und 400  $\mu\text{sec}$  bewegen, also rund doppelt so groß sind wie jene in Anlage 7, so daß die "relative Krümmung" der Verteilung in Anlage 8 als noch geringer eingeschätzt werden muß.

In Anlage 9 sind die entsprechenden Meßwerte für die zweite Wand zusammengestellt, die jedoch aus Bimsbeton-Hohlsteinen der Abmessung 24 cm x 49 cm x 24 cm aufgemauert war. Ersichtlich ergibt sich als Folge der in Impulswegrichtung jeweils zwei hintereinander liegenden je etwa 45 mm breiten Hohlräume in den Hohlsteinen keine einheitliche Verteilung mehr. Die Meßwege waren bei dieser Meßreihe bewußt so gewählt worden, daß sie, unter Berücksichtigung der in diesem Medium zu erreichenden Fokussierung, teilweise durch die hohlraumfreien Rand- und Mittelbereiche der Steine, teilweise mittig über die Hohlräume selbst, teilweise auch im Bereich der Hohlraumränder verliefen. Dabei ist zu bemerken, daß die spaltartigen Hohlräume sich zu ihren Rändern hin etwas verjüngen, so daß in etwa 5 bis 10 mm Umgebung der Ränder nur noch mit einer Spaltbreite von 35 bis 40 mm gerechnet werden muß. Um den Nachweis zu führen, daß die stark gekrümmte Verteilung in Anlage 9 tatsächlich nichts weiter darstellt als ein Kollektiv aus drei den genannten Einzelbereichen zugehörigen Teilverteilungen, wurde das Meßergebnis in Anlage 10 nach diesem Auswahlprinzip aufgeschlüsselt. Die drei Teilverteilungen ergaben, jeweils für sich, nunmehr im Wahrscheinlichkeitsnetz drei Geraden, deren zwei überdies - wie für eine Kollektivverteilung zu fordern - die Gesamtverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz nach oben und unten hin (zu maximalen und minimalen Laufzeiten hin) tangential einschließen.

Nachdem der Nachweis der Signifikanz einer festgestellten Verteilungskrümmung im Wahrscheinlichkeitsnetz damit geführt schien, wurde sicherheitshalber zusätzlich noch eine Wand aus Siporex-Gasbeton durchschallt,

deren Rohdichte nochmals um einen beträchtlichen Betrag gegenüber den Konstruktionsbetonen niedriger liegt ( $\gamma = 0,6 \text{ kg/dm}^3$ ). Von diesem Material darf angenommen werden, daß die darin enthaltenen, herstellungsbedingten und damit "gleichmäßig" verteilten Lufthohlräumen in jedem Falle weit oberhalb jener Grenze liegen, die als zulässiger Lufthohlraumdurchmesser für Konstruktionsbetone angesetzt werden muß. Sofern eine Krümmung der Werteverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz auch durch homogen verteilte, aber materialtypische Hohlräume hervorgerufen werden könnte, hätte sich dies an dieser Wand besonders deutlich herausstellen müssen. Ersichtlich wurde jedoch auch hier praktisch eine Gerade ermittelt: der Verlauf der Meßwerte läßt die Annahme einer Krümmung offenbar nicht zu.

#### 4. Schlußfolgerungen

Die im Zuge von Labor- und Baustellenerhebungen durch das Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig durchgeführten und aus Mitteln des Niedersächsischen Zahlenlottos ermöglichten Untersuchungen über die Brauchbarkeit von Ultraschallmessungen an Beton in der Baupraxis haben unterschiedliche Ergebnisse gebracht. Diese Ergebnisse wurden vorstehend an einigen charakteristischen Beispielen im Detail erläutert.

##### 4.1 Verwendbarkeit von Ultraschall bei der Suche nach Hohlräumen und Rissen im Beton

Das vom Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig entwickelte Ultraschall-Meßgerät hat bislang sowohl in umfangreichen Laboratoriumsversuchen als auch in zahlreichen Fällen auf der Baustelle oder am fertigen Bau unwiderlegbare Erfolge beim Aufsuchen von Hohlräumen und Rissen in Konstruktionsbetonen sowie beim Aufspüren unvollständig oder gar nicht ausgepreßter Bereiche von Spannkämen erbracht. Die Größe der noch einwandfrei identifizierbaren Mängel hängt naturgemäß von dem ausfüllendem Medium (Wasser oder Luft), von der Dicke



des durchschallten Bauteils und - in geringem Umfang - von der Qualität des untersuchten Betons ab. Im Bereich der üblicherweise zur Anwendung gelangenden Schwerbetone, also zwischen den Betongüteklassen B 160 und B 600 oder darüber, kann der letztgenannte Einfluß außer Acht bleiben. Eine Füllung größerer Hohlräume innerhalb von Konstruktionselementen mit Wasser ist in den meisten Fällen unwahrscheinlich. Der wesentliche Einfluß bei der Abschätzung der Leistungsfähigkeit der zerstörungsfreien Prüfung mittels Ultraschall auf diesem Gebiet bleibt demnach die Dicke des durchschallten Bauteils. Für das hier entwickelte und zur Anwendung gebrachte Gerät war die Identifikation von Rissen, die orthogonal zur Meßrichtung verlaufen und eine mittlere Dicke von 0,1 mm erreichen oder überschreiten, sowie von nicht materialtypischen, lokalen Hohlräumen in der Größenordnung von  $\geq 10$  mm mittleren Durchmessers bei Bauteildicken zwischen 14 und 40 cm einwandfrei möglich. Bei der gewählten Ultraschallimpulsfrequenz von rd. 50 kHz dürfte das auch dem möglichen Auflösungsvermögen solcher Impulse entsprechen. Problematisch würde das Erreichen dieser Werte vermutlich bei wesentlich größeren Bauteildicken, weil die Leistung des Gerätes nicht ausreichen würde, eine noch zur Verstärkung und Wiedergabe als identifizierbarer Empfangsimpuls ausreichende Impulsamplitude abzugeben. Die Entwicklung eines Impulsgenerators höherer Leistung bei sonst gleichen Eigenschaften ist jedoch lediglich als wirtschaftliches Problem zu betrachten.

#### 4.2 Verwendbarkeit von Ultraschall bei der Beurteilung des Betonzustandes

Über das im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau entworfene und in umfangreichen Versuchen an Laboratoriumsbetonen mit gutem Erfolg erprobte Verfahren zur Beurteilung des allgemeinen Gefügestandes, insbesondere des "Vorbelastungsgrades", wurde bereits an anderer Stelle ausführlich berichtet. Mit den Mitteln des Niedersächsischen Zahlenlottos war es möglich, der Brauchbarkeit dieses Verfahrens auch in der Baupraxis nachzugehen. Es hat sich dabei gezeigt, daß auch in der Praxis nicht nur dem arithmetischen Mittel der festgestellten Ultraschall-Laufzeitwerte

und auch nicht nur den lokalen Einzelmeßwerten, sondern auch dem sich bei der statistischen Auswertung in Hinblick auf eine mögliche Gauss-Verteilung der Werte ergebenden Gesamtbild eine große Bedeutung beigemessen werden muß. Für eine summarische Beurteilung der allgemeinen Ausführung oder des allgemeinen Erhaltungszustandes eines Bauteils oder Bauwerkes gibt dieses Bild einen viel klareren Anhalt als die einfache Ermittlung der Häufigkeit deutlich schadhafter Stellen im Verhältnis zur zufälligen Gesamtzahl der ermittelten Werte. Darüber hinaus läßt eine Analyse dieses Bildes in jenen Fällen, in denen gerade keine einfache Gauss-Verteilung herauskommt, vielfach weitergehende Schlüsse auf die Einheitlichkeit und damit evtl. auch auf die Ursachen festgestellter Schäden zu.

#### 4.3 Anwendungsgrenzen

Im Hinblick auf den vielfach geäußerten Wunsch, Betonfestigkeiten anhand von Impulslaufzeitmessungen zu ermitteln, konnten die Untersuchungen des Instituts kein positives Ergebnis erbringen. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer einschlägiger Institute haben sowohl die an Baustellen erzielten Resultate (bei Vergleich mit den an Bohrkernen ermittelten Druckfestigkeiten) als auch die sehr umfangreichen Untersuchungen im Laboratorium gezeigt, daß der Versuch, die zerstörende Prüfung durch Bohrkernentnahme zu ersetzen, kaum Aussicht auf Erfolg hat. In diesem Zusammenhang ist den Resultaten der Laboratoriumsversuche wohl Bedeutung beizumessen, weil hier mit den unter günstigen Verhältnissen besonders gleichmäßig und homogen hergestellten Betonkörpern die Voraussetzungen für eine reproduzierbare Beziehung zwischen Ultraschallimpulslaufzeit und Betonfestigkeit optimal waren.

Ungeachtet dieses Mißerfolgs darf nicht übersehen werden, daß die Ultraschallprüfung auch hier bereits erhebliche Vorteile gebracht hat: Das "quasi-zerstörungsfreie" Prüfverfahren, daß besonders von anderen Instituten bereits seit einigen Jahren mit offenbar brauchbarem Erfolg geübt wird und in der Entnahme einer auf größenordnungsmäßig 3 bis 10 beschränkten Zahl von Bohrkernen und der Ermittlung der restlichen großen

Zahl von lokalen Festigkeiten am gleichen Gebäude bzw. am gleichen Bauteil auf dem Umweg über Ultraschallmessungen und deren Eichung anhand der gezogenen Bohrkerne besteht, bietet in jedem Fall ein wesentlich größeres Maß an Sicherheit als die Beurteilung des gesamten Gebäudes nur anhand der Bohrkerne, deren Zahl ohnehin aus wirtschaftlichen, statischen und ästhetischen Gründen beschränkt sein muß. In neuester Zeit wird dieses Verfahren von einigen Autoren weniger günstig beurteilt [10].

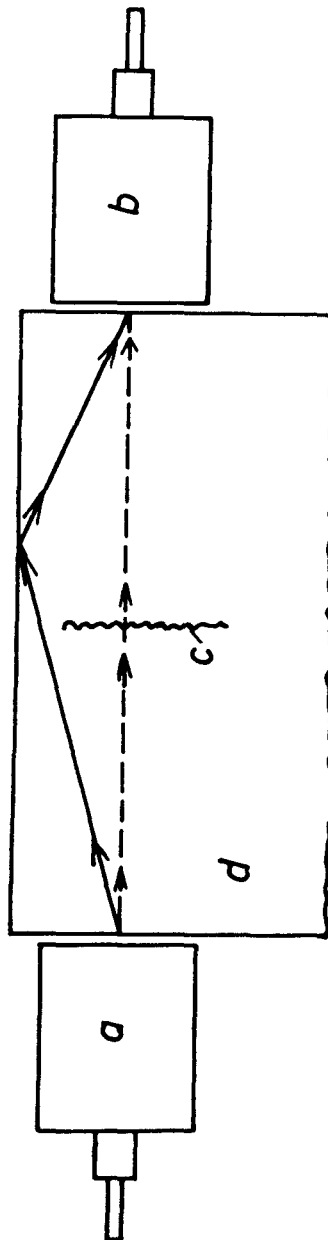
Die Ermittlung von Ultraschallimpulsgeschwindigkeiten in Bauteilen muß also vom Standpunkt der Ergänzung der bereits vorhandenen anerkannten Prüfverfahren der Baupraxis gesehen werden, nicht als möglicher Ersatz solcher Verfahren: aus diesem Blickwinkel muß das Urteil über diese relativ junge Prüfmöglichkeit positiv ausfallen.

## 5. Zusammenfassung

Im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig wurden mit Mitteln des Niedersächsischen Zahlenlottos die Untersuchungen, die in den Jahren 1965 bis 1967 seitens des Institutes im Laboratorium und auf der Baustelle mit einem eigens dafür entwickelten Ultraschallimpulsgerät an Stahlbetonbauteilen durchgeführt wurden, ergänzt und im Hinblick auf die allgemeine Beurteilung der Brauchbarkeit dieser Prüfmethode statistisch ausgewertet. Dabei zeigte es sich, daß dieses zerstörungsfreie Prüfverfahren dem Prüfenden eine sichere und wirtschaftliche Methode zur nachträglichen Ermittlung von äußerlich unsichtbaren, hohlraum- oder rißartigen Ausführungsmängeln und zur Beurteilung des allgemeinen Gefügezustandes des Betons nach vorhergegangenen Belastungen an die Hand gibt. Demgegenüber muß dem Versuch, Bauwerksfestigkeiten von Betonen allein anhand von Ultraschallmessungen zu überprüfen, mit großer Skepsis begegnet werden. Als Hilfsmittel zur Erhöhung der Sicherheit der Ergebnisse, zu denen man aufgrund der Entnahme beschränkter Bohrkernstückzahlen aus zu überprüfenden Gebäuden gelangt, kann die Ultraschallmessung jedoch auch hier Wertvolles leisten.

## 6. Literatur

- [1] K. Kordina, N.V. Waubke,  
V. Roy: Ultraschallmessungen an Laboratoriumsbetonen  
Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen,  
Leipzig (1966), Nr. 21/22, S. 71 - 72
- [2] K. Kordina, V. Roy,  
N.V. Waubke: Ultraschallmessungen an bewehrten Kiesbetonen  
Materialprüfung 9 (1967), Nr. 3, S. 81 - 85
- [3] V. Roy: Ultraschallimpulslaufzeitmessungen an Beton  
Dissertation TH Braunschweig,  
in Vorbereitung
- [4] E. Mundry:  
[5] Über das Verhalten teildurchlässiger Zwischen-  
flächen bei der zerstörungsfreien Material-  
prüfung mit Ultraschall  
Teil I und Teil II,  
Materialprüfung 8 (1966), Nr. 12, S. 433 - 444  
Materialprüfung 9 (1967), Nr. 4, S. 120 - 130
- [6] E. Mundry: Zerstörungsfreie Prüfung von Verbundteilen  
Materialprüfung 9 (1967), Nr. 8, S. 296 - 302
- [7] E. Pohl: Zerstörungsfreie Prüfmethode für Beton  
VEB-Verlag für das Bauwesen, Berlin 1966
- [8] J. Matauschek: Einführung in die Ultraschalltechnik  
VEB-Verlag Technik, Berlin 1961
- [9] J. Krautkrämer,  
H. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall  
Springer-Verlag Berlin - Göttingen - Heidelberg  
1961
- [10] z.B.: H. Weigler: Erfahrungen bei der zerstörungsfreien Be-  
stimmung der Betondruckfestigkeit  
Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Bau-  
wesen, Leipzig (1966), Nr. 21/22, S. 73 - 74



- a : Geber  
 b : Aufnehmer  
 c : Riß  
 d : Betonwürfel

Bei randnaher Messung kommt der an der Wand reflektierte Impuls zuerst an

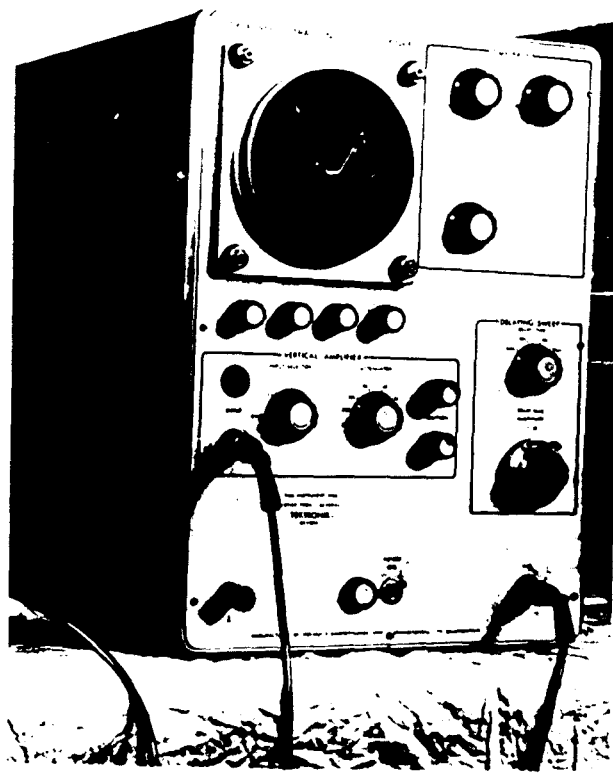
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
 Technische Hochschule Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen  
 http://www.dig

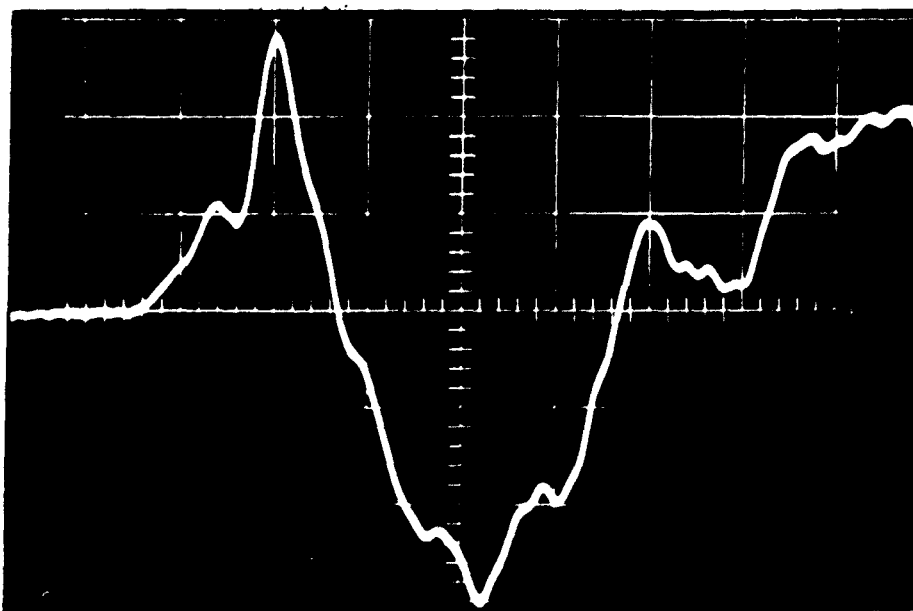
Anlage 1  
 zum Bericht

II A b V 4. - 107/66

26/02/2014



Figur 2a: Ultraschallimpuls-Prüfgerät



Figur 2b: Empfangsoszillogramm

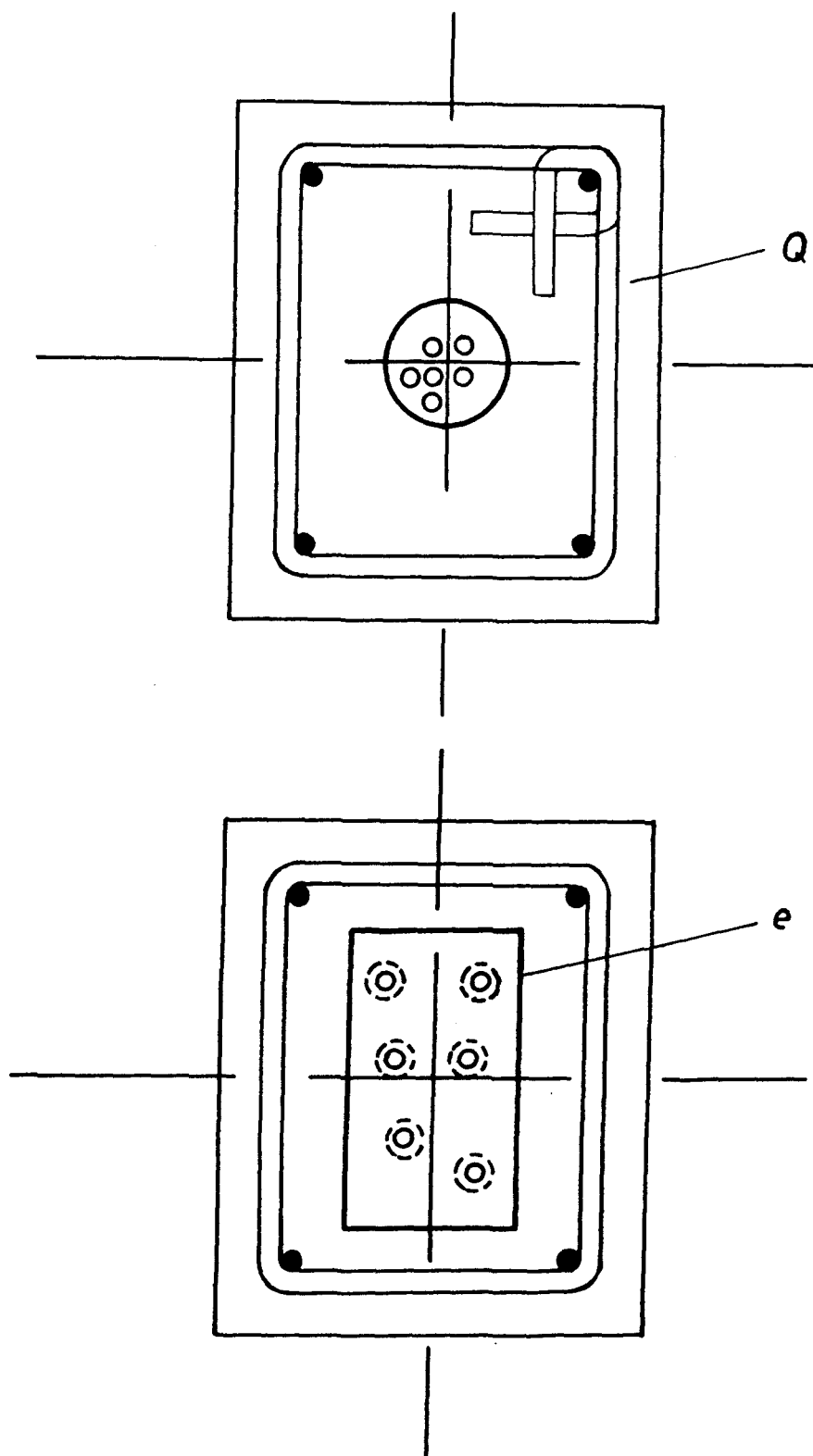
Anlage 2  
zum Bericht

II A b V 4. - 107/66

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig

<http://www.institut-fuer-baustoffkunde.de/> Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

26/02/2014



*Q = Querschnitt Hängesäule Celle mit Spannkanaal*

*e = Spannkrafteinleitungsbereich mit erweitertem Hüllrohr*

**Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau**  
*Technische Hochschule Braunschweig*

**Ämliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen**

**Anlage 3**

zum Bericht

II A b V 4. - 107/66

T a f e l    1

Klasse	Z a h l   d e r   M e ß w e r t e		
	insgesamt	davon am intakten Bauteil	davon am defekten <sup>+</sup> ) Bauteil
50,0 - 50,9	0	0	0
51,0 - 51,9	0	0	0
52,0 - 52,9	0	0	0
53,0 - 53,9	1	1	0
54,0 - 54,9	1	1	0
55,0 - 55,9	1	1	0
56,0 - 56,9	10	9	1
57,0 - 57,9	26	25	1
58,0 - 58,9	49	41	8
59,0 - 59,9	59	54	5
60,0 - 60,9	68	59	9
61,0 - 61,9	57	51	6
62,0 - 62,9	34	32	2
63,0 - 63,9	26	20	6
64,0 - 64,9	15	15	0
65,0 - 65,9	12	6	6
66,0 - 66,9	13	3	10
67,0 - 67,9	6	1	5
68,0 - 68,9	5	0	5
69,0 - 69,9	0	0	0
70,0 - 70,9	3	0	3
71,0 - 71,9	0	0	0
72,0 - 72,9	1	0	1
73,0 - 73,9	3	0	3
74,0 - 74,9	2	1	1
75,0 - 75,9	2	0	2
76,0 - 76,9	1	0	1
77,0 - 77,9	1	0	1
78,0 - 78,9	2	0	2
79,0 - 79,9	3	0	3
80,0 - 80,9	6	0	6

Fortsetzung der Tafel siehe folgendes Blatt.



T a f e l 1 (Fortsetzung)

Klasse	Z a h l d e r M e ß w e r t e		
	insgesamt	davon am intakten Bauteil	davon am defekten <sup>+</sup> ) Bauteil
81,0 - 81,9	4	0	4
82,0 - 82,9	0	0	0
83,0 - 83,9	1	0	1
84,0 - 84,9	0	0	0
85,0 - 85,9	3	0	3
86,0 - 86,9	1	0	1
87,0 - 87,9	5	0	5
88,0 - 88,9	3	0	3
89,0 - 89,9	3	0	3
90,0 - 90,9	1	0	1
91,0 - 91,9	4	0	4
92,0 - 92,9	2	0	2
93,0 - 93,9	0	0	0
94,0 - 94,9	2	0	2
95,0 - 95,9	3	0	3
96,0 - 96,9	1	0	1
97,0 - 96,9	1	0	1
98,0 - 98,9	4	0	4
99,0 - 99,9	0	0	0
100,0 - 100,9	0	0	0
101,0 - 101,9	1	0	1
102,0 - 102,9	1	0	1
103,0 - 103,9	1	0	1
104,0 - 104,9	1	0	1
105,0 - 105,9	1	0	1
106,0 - 106,9	5	0	5
107,0 - 107,9	0	0	0
108,0 - 108,9	1	0	1
109,0 - 109,0	0	0	0
110,0 - 110,9	0	0	0

Fortsetzung der Tafel siehe folgendes Blatt.

T a f e l 1 (Fortsetzung)

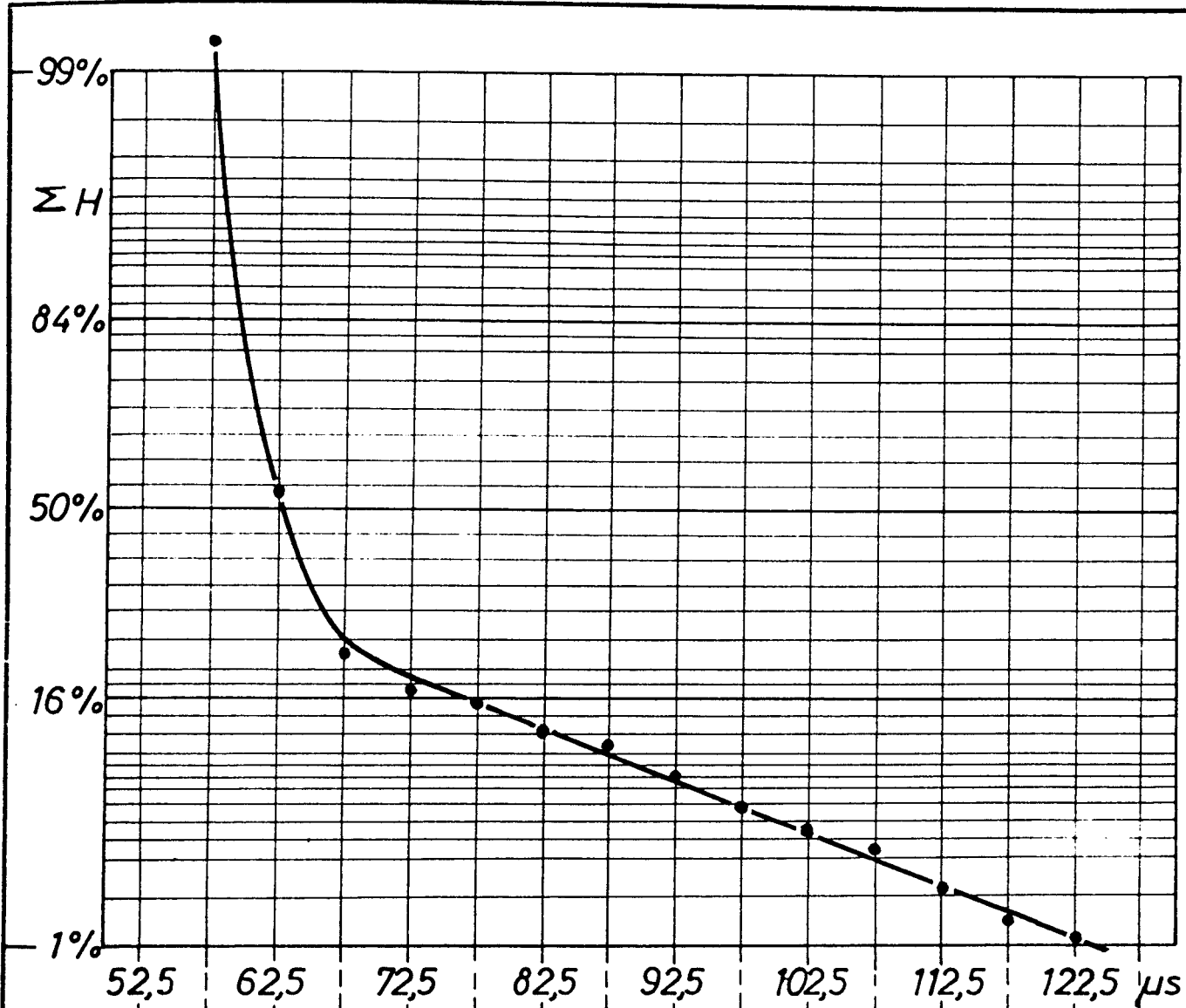
Klasse	Z a h l d e r M e ß w e r t e		
	insgesamt	davon am intakten Bauteil	davon am defekten*) Bauteil
111,0 - 111,9	0	0	0
112,0 - 112,9	1	0	1
113,0 - 113,9	1	0	1
114,0 - 114,9	0	0	0
115,0 - 115,9	1	0	1
116,0 - 116,9	1	0	1
117,0 - 117,9	1	0	1
118,0 - 118,9	0	0	0
119,0 - 119,9	0	0	0
120,0 - 120,9	0	0	0
121,0 - 121,9	0	0	0
122,0 - 122,9	0	0	0
123,0 - 123,9	0	0	0
124,0 - 124,9	0	0	0
125,0 - 125,9	0	0	0
126,0 - 126,9	0	0	0
127,0 - 127,9	1	0	1
128,0 - 128,9	0	0	0
129,0 - 129,9	0	0	0
130,0 - 130,9	0	0	0
131,0 - 131,9	0	0	0
132,0 - 132,9	0	0	0
133,0 - 133,9	0	0	0
134,0 - 134,9	0	0	0
135,0 - 135,9	0	0	0
136,0 - 136,9	1	0	1
137,0 - 137,9	0	0	0
138,0 - 138,9	0	0	0
139,0 - 139,9	0	0	0
140,0 - 140,9	0	0	0

Fortsetzung der Tafel siehe folgendes Blatt.

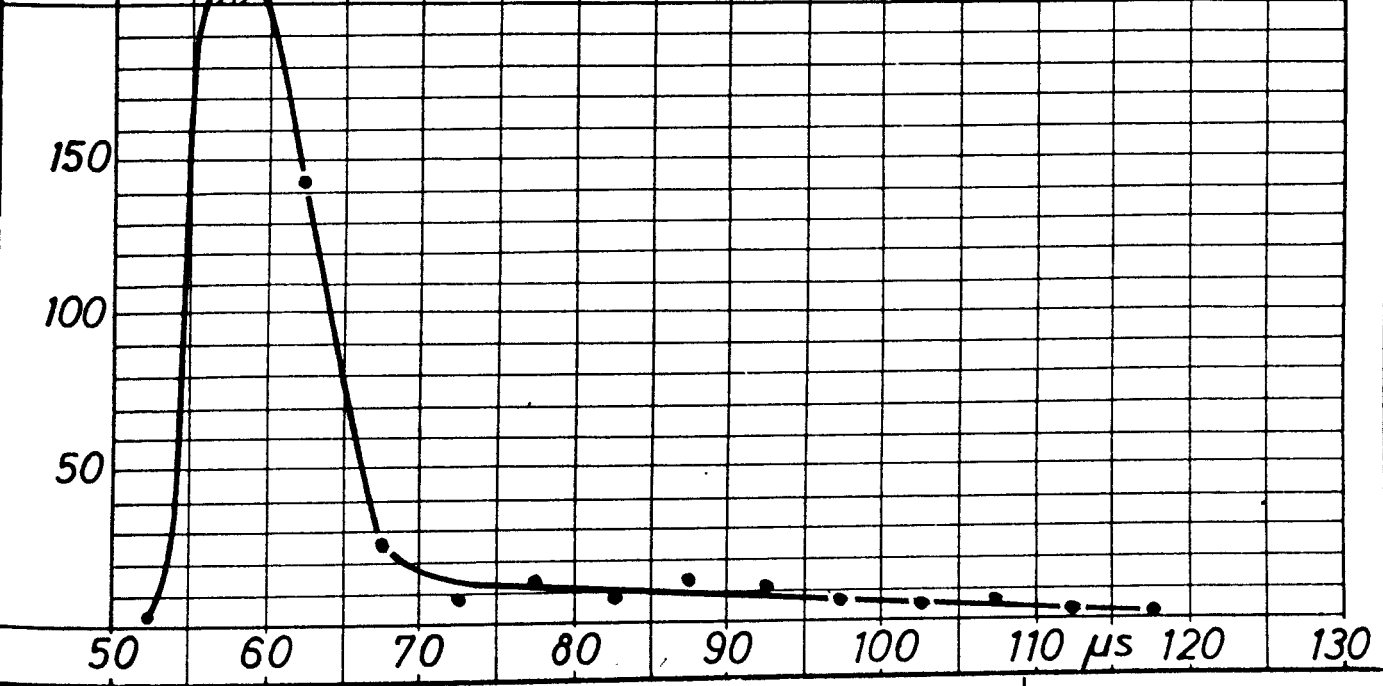
T a f e l 1 (Fortsetzung)

Klasse	Z a h l d e r M e ß w e r t e		
	insgesamt	davon am intakten Bauteil	davon am defekten <sup>+</sup> ) Bauteil
141,0 - 141,9	0	0	0
142,0 - 142,9	0	0	0
143,0 - 143,9	0	0	0
144,0 - 144,9	0	0	0
145,0 - 145,9	0	0	0
146,0 - 146,9	0	0	0
147,0 - 147,9	1	0	1
148,0 - 148,9	0	0	0
149,0 - 149,9	1	0	1
150,0 - 150,9	0	0	0
151,0 - 151,9	0	0	0
152,0 - 152,9	0	0	0
153,0 - 153,9	0	0	0
154,0 - 154,9	0	0	0
155,0 - 155,9	0	0	0
156,0 - 156,9	0	0	0
157,0 - 157,9	1	0	1
158,0 - 158,9	0	0	0
159,0 - 159,9	0	0	0
Summe der Werte	466	320	146

+ ) Im Bereich äußerlich sichtbarer Risse oder schadhaften Betons bzw. im Bereich nachträglich als unausgenreßt festgestellter Spannkanele.



ΣH	100	99,36	53,86	22,96	17,17	15,45	12,66	10,94	8,15	5,79	4,51	3,43	2,15	1,50	1,07
ΣN	466	463	251	107	80	72	59	51	38	27	21	16	10	7	5
N	3	212	144	27	8	13	8	13	11	6	5	6	3	2	0



Wertekollektiv Stichprobe Stromversorgung  
 Celler

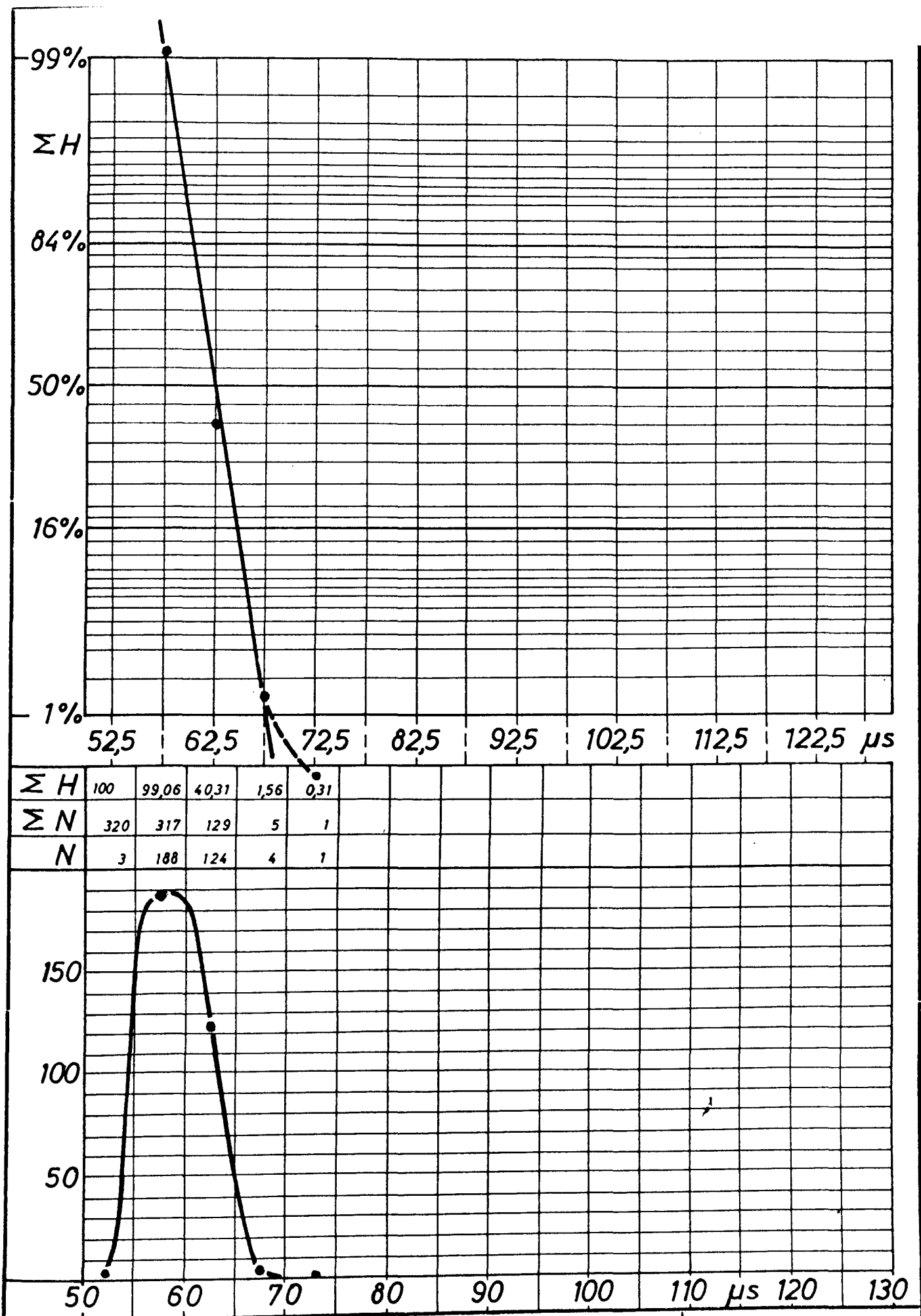
Anlage 4

zum Bericht

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
 Technische Hochschule Braunschweig

II A b 4. - 10/66

Amliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Aus Messungen am „intakten“ Objekt  
gewonnene Werte

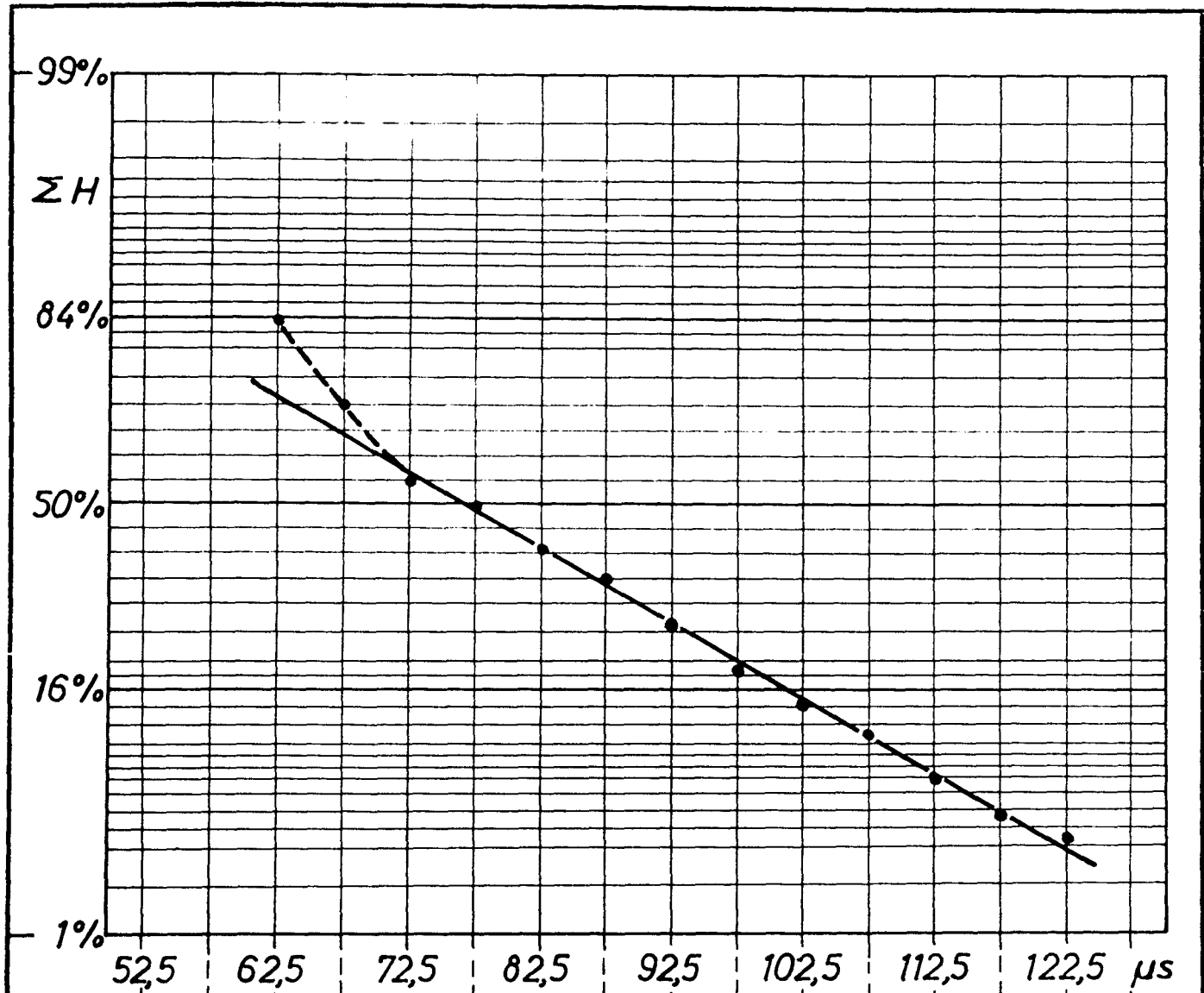
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig

Amliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

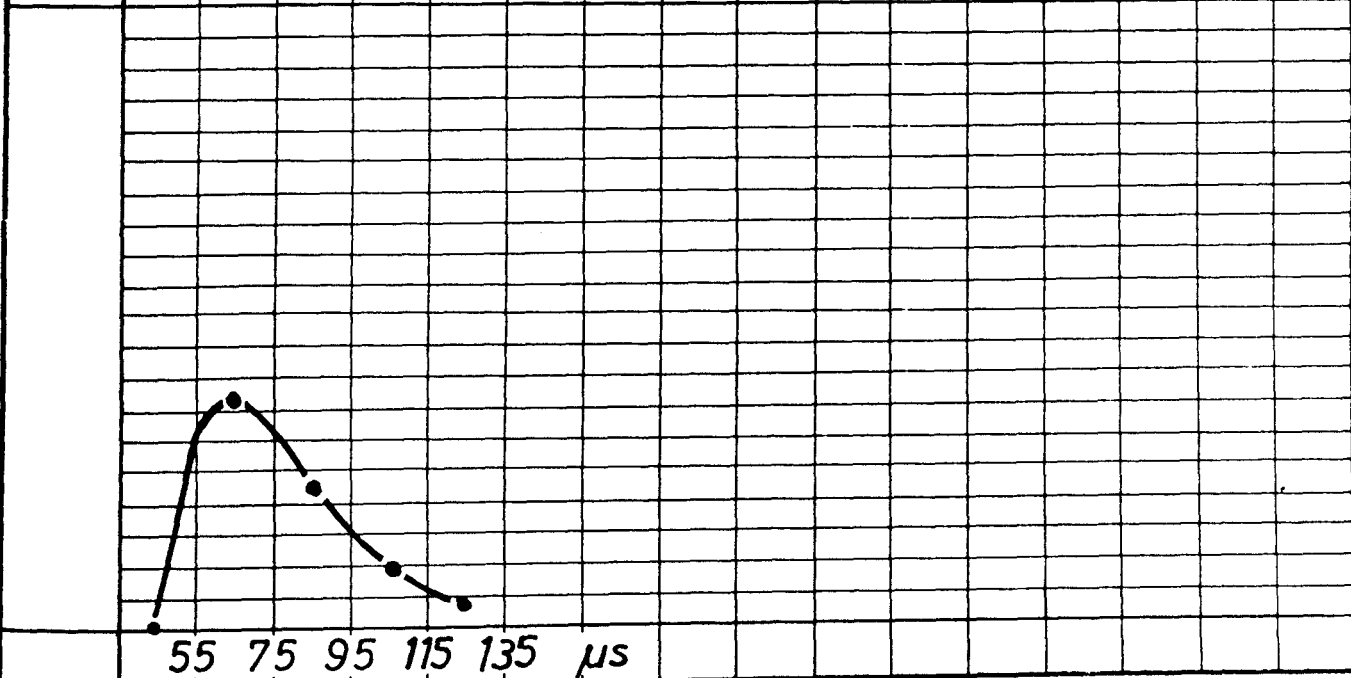
Anlage 5

zum Bericht

II A b V 4. - 107/66



$\Sigma H$		100	83,56	69,86	54,11	49,32	40,41	34,93	26,03	18,49	14,38	10,96	6,85	4,79	3,42
$\Sigma N$		146	122	102	79	72	59	51	38	27	21	16	10	7	5
$N$	0	24	20	23	7	13	8	13	11	6	5	6	3	2	0



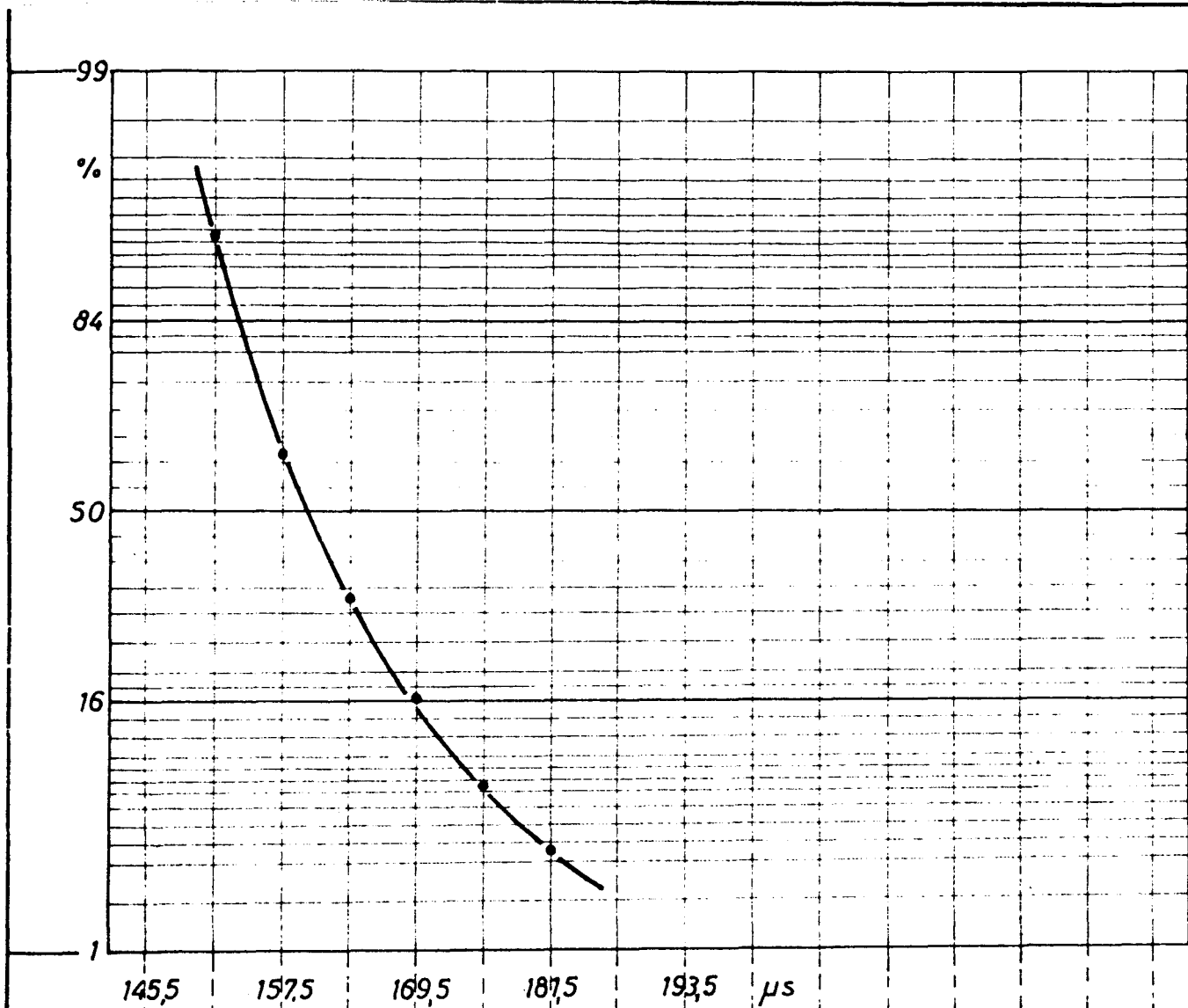
Aus Messungen am „defekten“ Objekt  
gewonnene Werte

Anlage 6

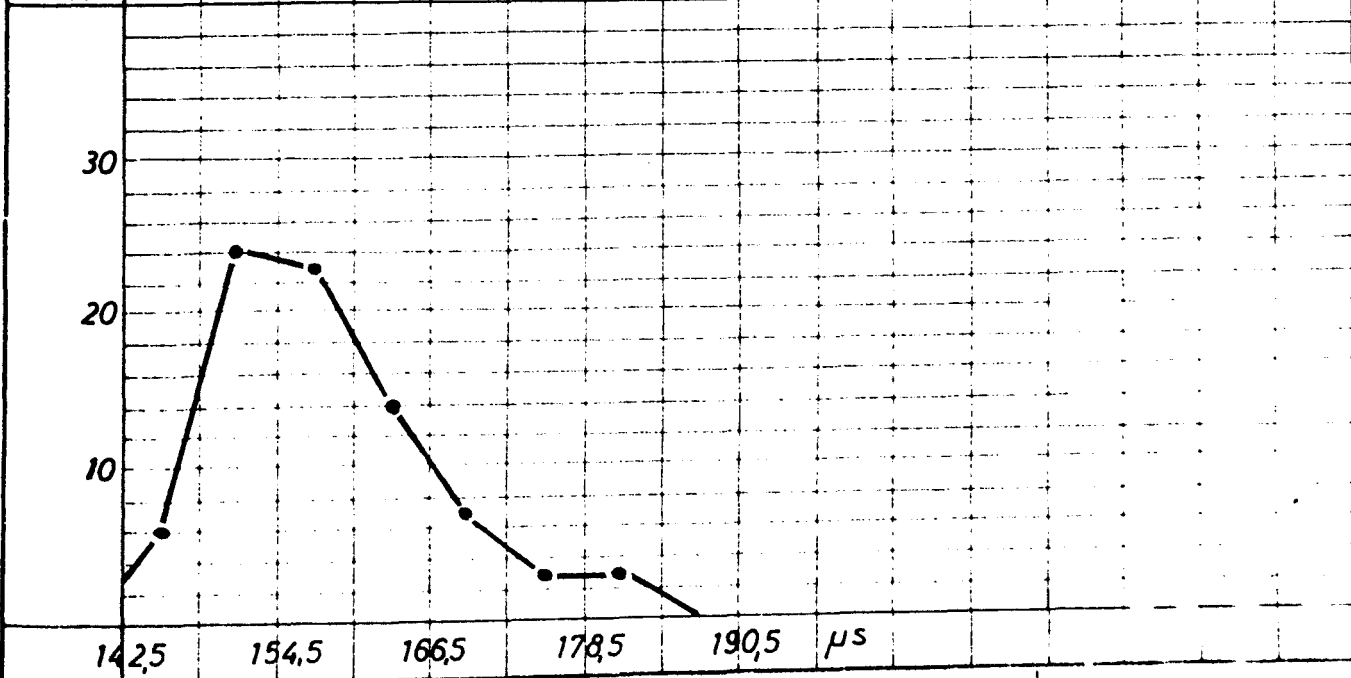
zum Bericht

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig

II A b V 4. - 107/66



Ü in %	100	92,5	62,5	33,8	16,3	7,5	3,6
Σ N	80	74	50	27	13	6	3
N	6	24	23	14	7	3	3

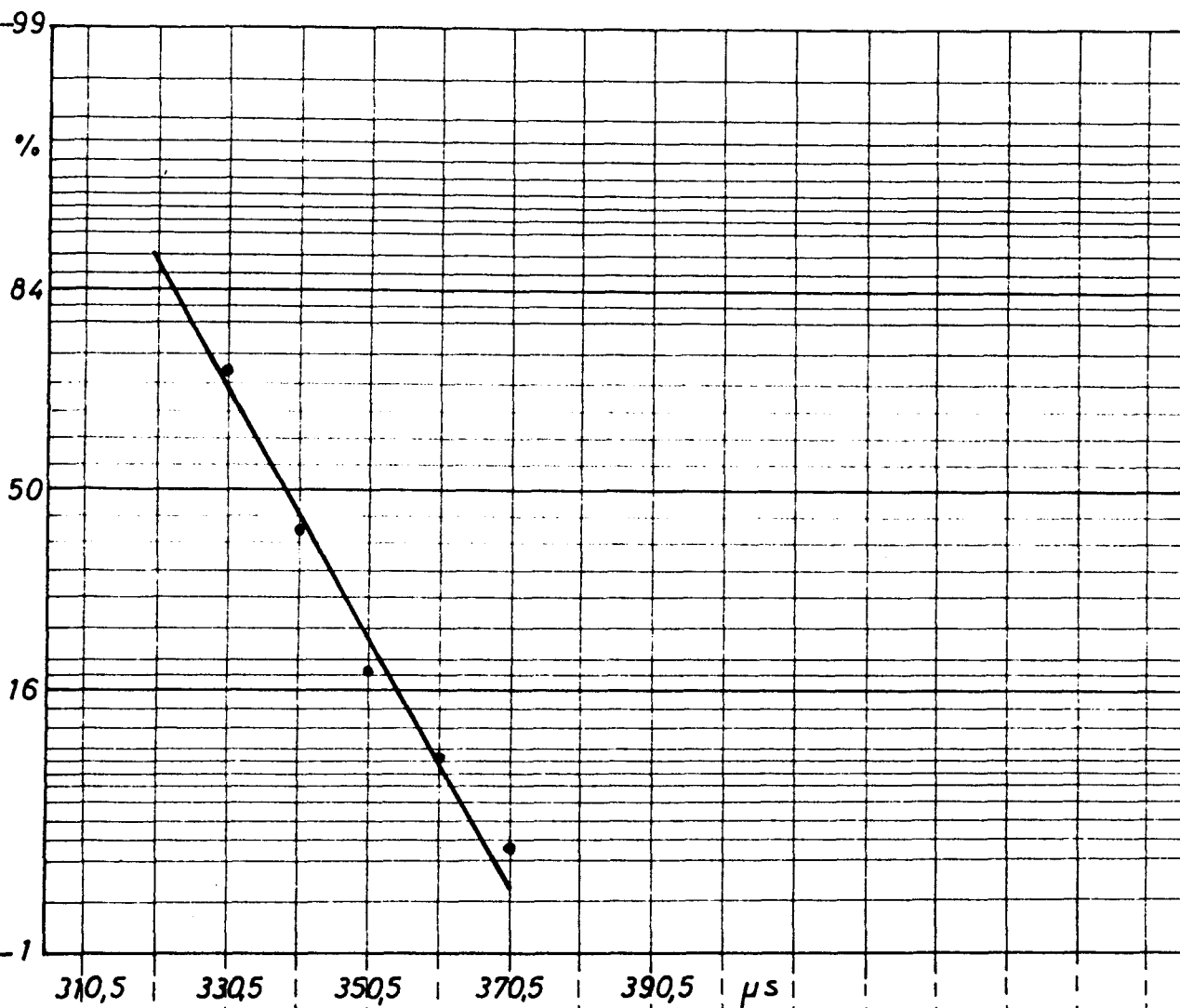


Wertekollektiv Stichprobe Stahlbetonstütze

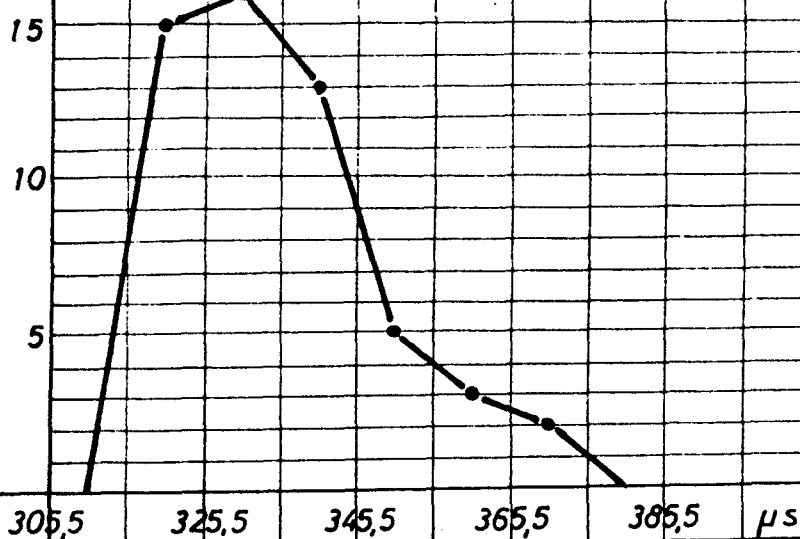
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig

Amiliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 7



Ü in %	100	72,2	42,6	18,5	9,3	3,6
Σ N	54	39	23	10	5	2
N	15	16	13	5	3	2



Wertekollektiv Bimsbetonvollsteinwand  
24cm x 49cm x 11,5cm  $\gamma = 1,01 \text{ kg/dm}^3$

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig

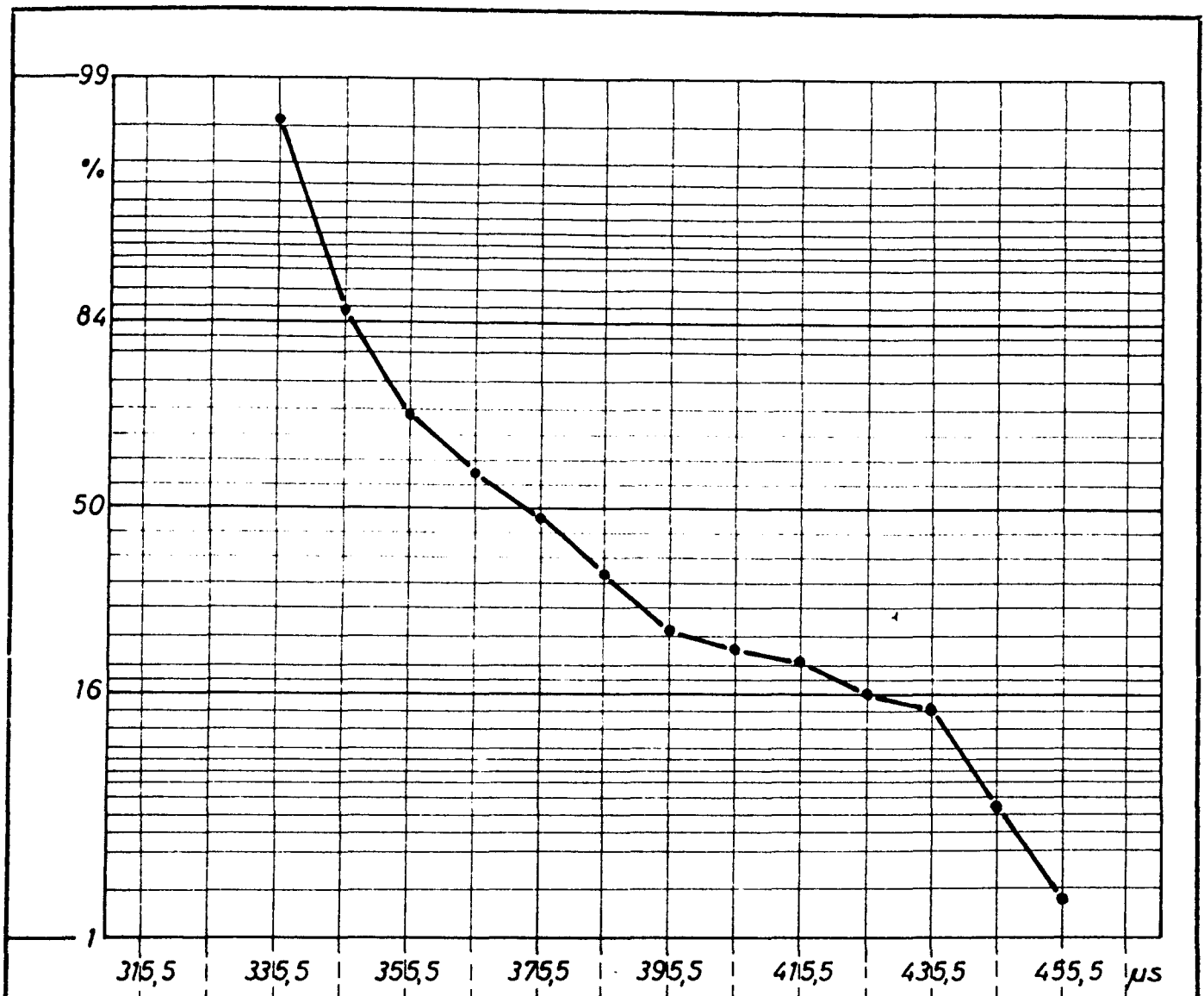
Amliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 8

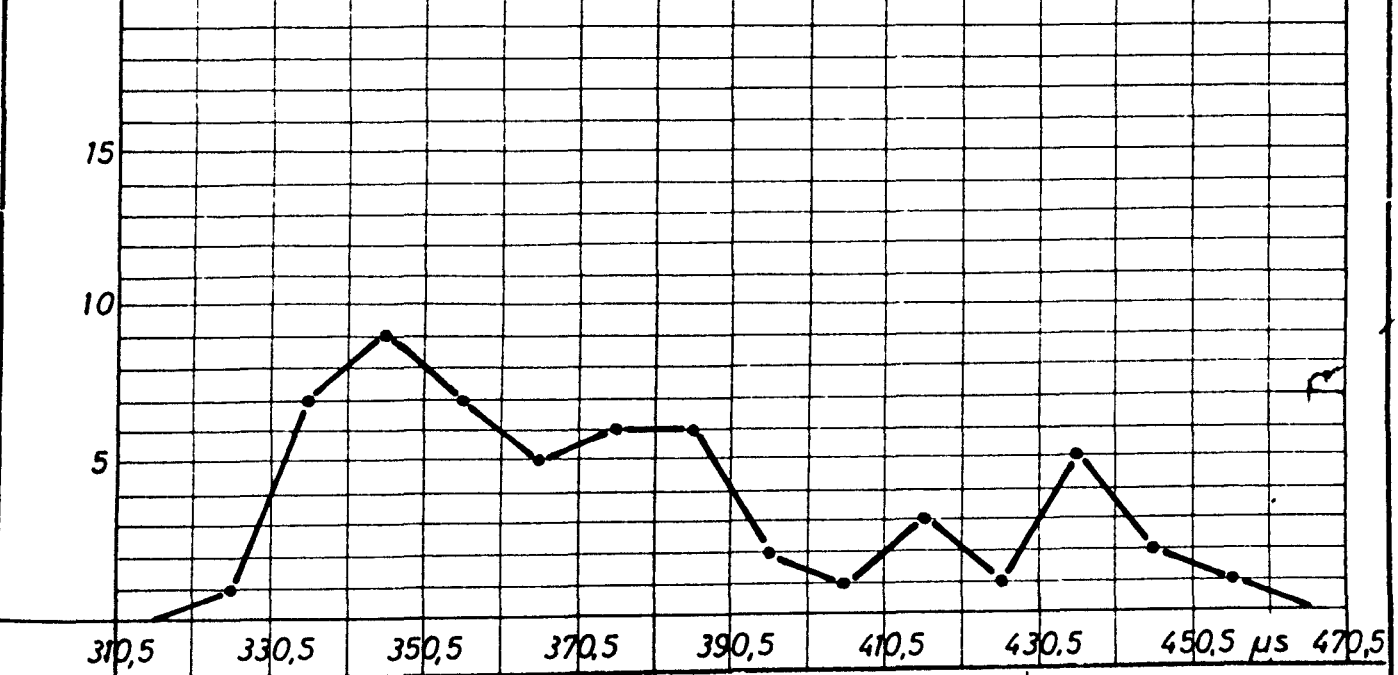
zum Bericht

II A b V 4. - 10/66





Ü in %	100	98,2	85,7	69,6	57,1	48,2	37,5	26,8	23,2	21,4	16,1	14,3	5,4	1,8
$\Sigma N$	56	55	48	39	32	27	21	15	13	12	9	8	3	1
N	1	7	9	7	5	6	6	2	1	3	1	5	2	1



Wertekollektiv Bimsbetonhohlsteinwand  
 24cm x 49cm x 24cm  $\gamma \approx 1,0 \text{ kg/dm}^3$

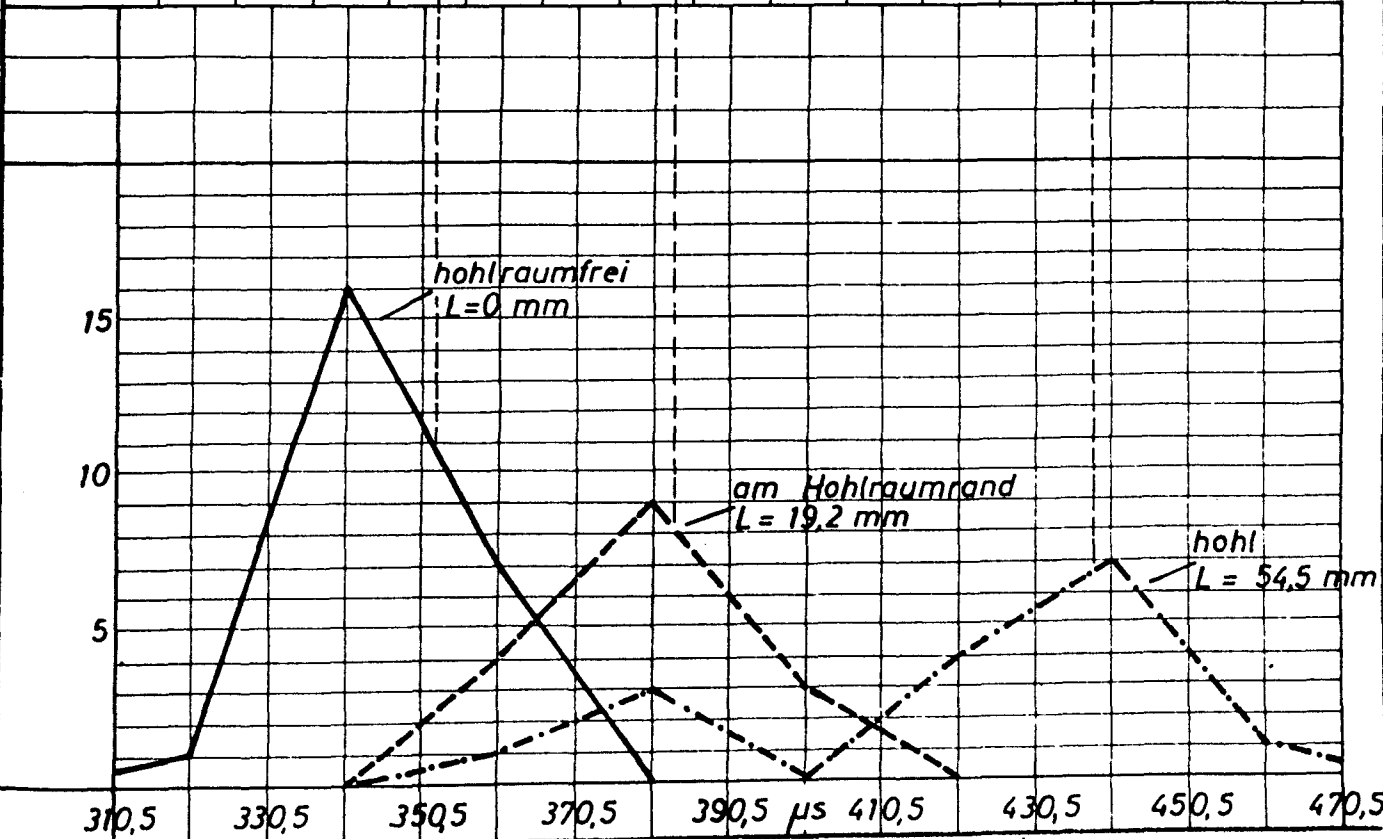
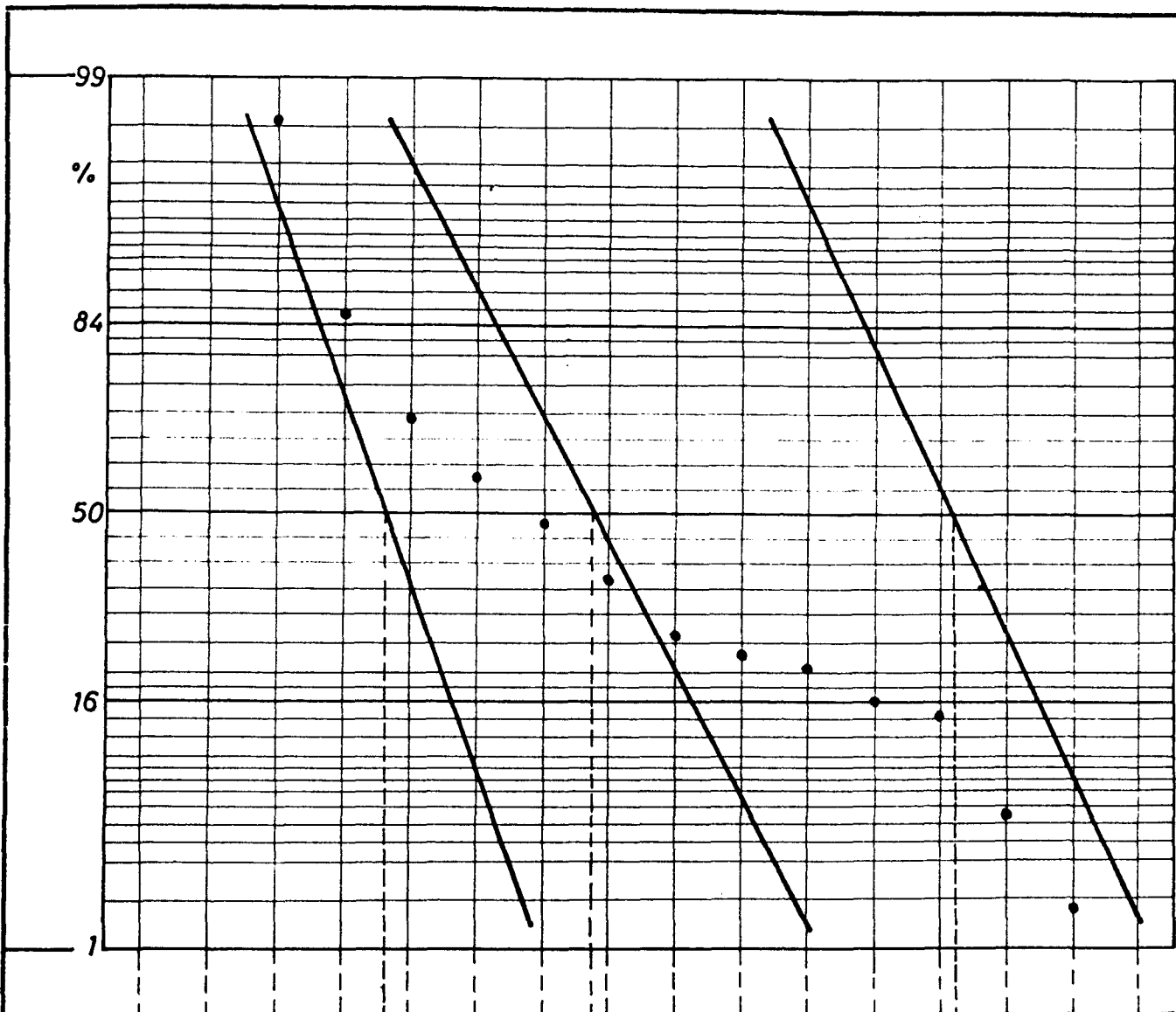
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
 Technische Hochschule Braunschweig

Amliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 9

zum Bericht

II A B V 4. - 107/66



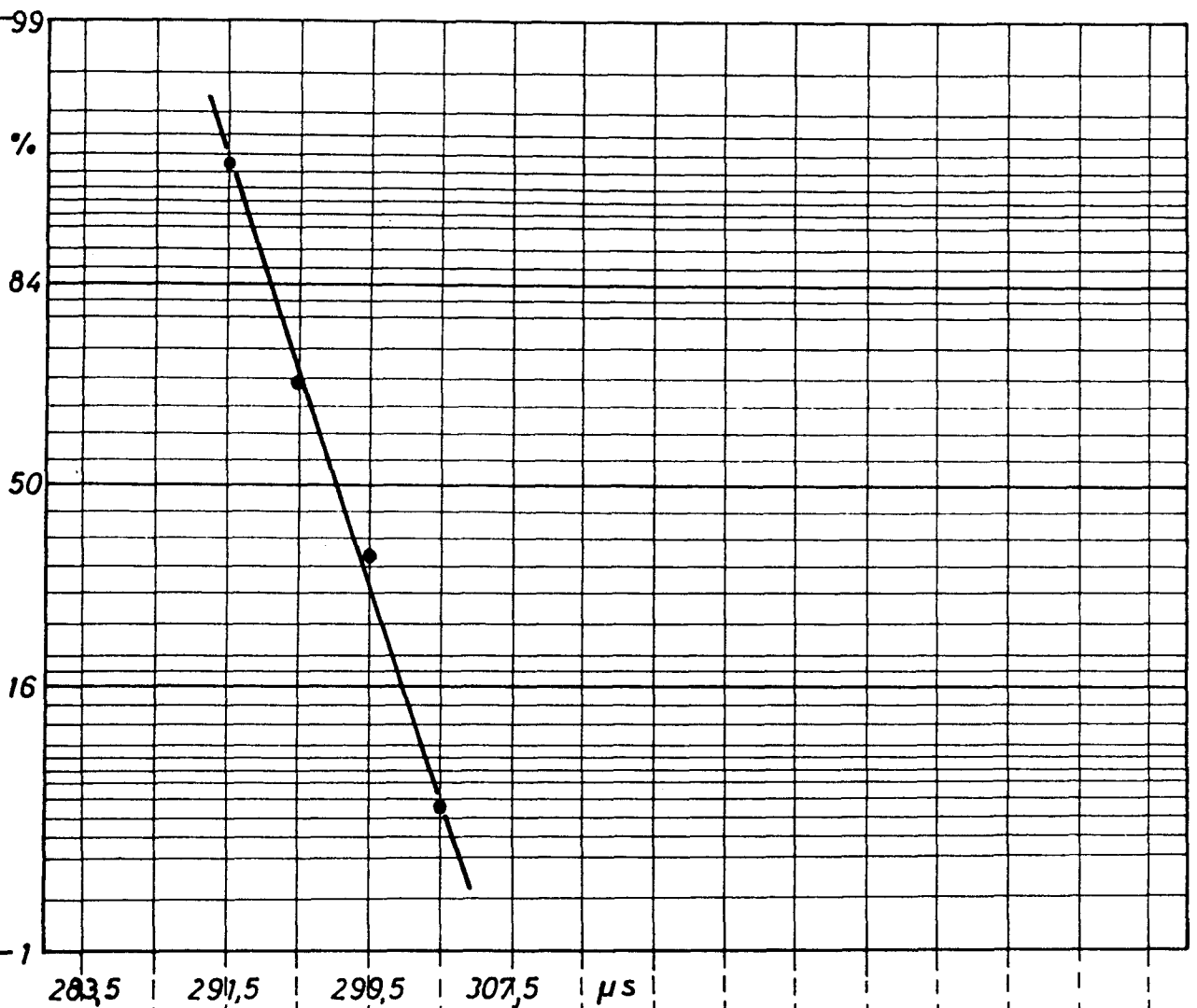
Wertekollektiv Bimsbetonhohlsteinwand  
zerlegt, Hohlraumlänge =  $L$

Anlage 10  
zum Bericht

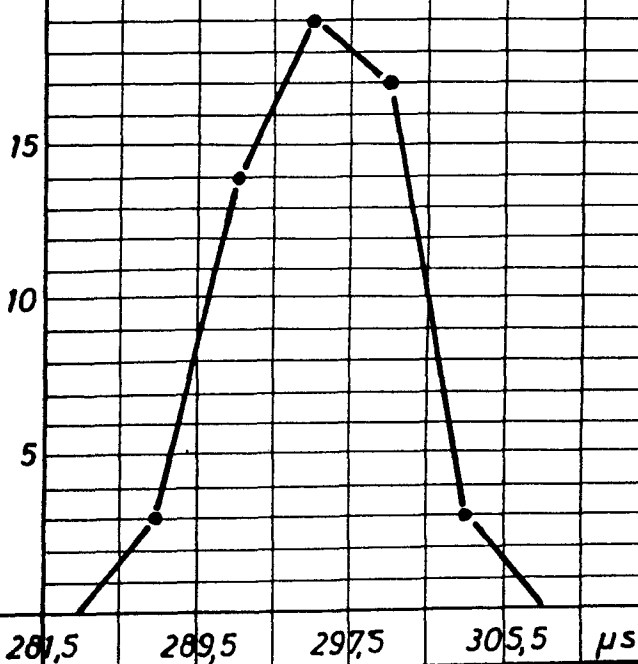
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Hochschule Braunschweig

11 A 6 V 4, - 107/60

Amliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Ü in %	100	94,6	69,6	35,7	5,7
Σ N	56	53	39	20	3
N	3	14	19	17	3



Wertekollektiv Siporex - Gasbeton GsB 35  
 $\gamma \approx 0,6 \text{ kg/dm}^3$

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
 Technische Hochschule Braunschweig

Anteilige Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 11

zum Bericht

II A b V 4. - 10/7/66